

4. Заключение

Исследована зависимость линейной плотности электронного тока и радиуса формирования виртуального катода в отражательном триоде от напряжения, геометрии диода и прозрачности анодной сетки для сходящегося и расходящегося пучков.

Результаты расчетов дают возможность определить положение виртуального катода для систем с

расходящимся и сходящимся пучками и установить преимущества того или иного типа системы.

Стационарные параметры отражательных триодов изучены в широком диапазоне ускоряющих напряжений, включая наиболее интересный с точки зрения генерации мощных электромагнитных импульсов. В области нерелятивистских напряжений расчеты тока в диоде совпадают с результатами работы [5].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Диденко А.Н., Григорьев В.П., Жерлицын А.Г. Генерация электромагнитных колебаний в системах с виртуальным катодом // В сб.: Плазменная электроника / Под ред. В.И. Курилко. – Киев: Наукова думка, 1989. – С. 112–131.
2. Григорьев В.П. Электромагнитное излучение в коаксиальном триоде с виртуальным катодом // Журнал технической физики. – 1994. – Т. 64. – № 7. – С. 122–129.
3. Антошкин М.Ю., Григорьев В.П., Коваль Т.В. Численная модель для исследования возбуждения аксиально-несимметричных волн в коаксиальных виркатора // Радиотехника и электроника. – 1995. – № 8. – С. 1300–1305.
4. Григорьев В.П., Коваль Т.В., Курьяков А.М. Усиление электромагнитных волн в коаксиальном триоде с виртуальным катодом // Радиотехника и электроника. – 1995. – № 9. – С. 1422–1427.
5. Langmuir I., Blodgett K.B. Currents limited by space charge between coaxial cylinders // Phys. Rev. – 1923. – V. 22. – P. 347–356.
6. Wheeler C.B. Space charge limited current flow between coaxial cylinders at potentials up to 15 MV // J. Phys. A: Math. Gen. – 1977. – V. 10. – № 4. – P. 631–636.
7. Рухадзе А.А., Рыбак П.В., Ходотаев Я.К., Шокри В. О предельных токах электронных пучков в коаксиальных системах // Физика плазмы. – 1996. – Т. 22. – № 4. – С. 358–366.

Поступила 14.04.2008 г.

УДК 535.36

ПЕРЕНОС ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В УСЛОВИЯХ РАЗОРВАННОЙ ОБЛАЧНОСТИ

Б.В. Горячев, С.Б. Могильницкий

Томский политехнический университет
E-mail: msb@tpu.ru

Исследовано влияние параметров облачности на радиационный баланс атмосферы. Установлено, что наибольший вклад в альбедо облачной атмосферы вносят облака с максимальной степенью симметрии. Обобщен принцип инвариантности для рассеивающих сред неограниченных поперечных оптических размеров на случай пространственно ограниченных дисперсных сред. Определена зависимость радиационного баланса облачной атмосферы от оптических размеров облаков при постоянном балле облачности и введен параметр, характеризующий степень дробления облачности.

Ключевые слова:

Перенос оптического излучения, параметры облачности, рассеивающие среды, радиационный баланс, дробление облачности.

Облачные образования оказывают определяющее влияние на радиационный баланс атмосферы. Создание оптической модели разорванной облачности, которая учитывала бы многообразие и динамическую изменчивость факторов, определяющих оптические свойства облаков и радиационный баланс атмосферы, является сложной задачей [1–3]. Для расчета радиационного баланса атмосферы необходимо знание микрофизических и оптических характеристик отдельного облака (размеры облака, распределение по размерам частиц водного аэрозоля, оптические размеры, спектральная индикатриса рассеяния излучения, вероятность выживания кванта, слоистая структура и форма обла-

ка) вместе с параметрами пространственной структуры разорванной облачности (такими параметрами являются: степень перекрытия атмосферы облачными образованиями – балл облачности, оптическая толщина, степень дробления и форма облаков). При определении причинно-следственных связей между физическими явлениями, принципиальное значение имеет однозначность традиционных или вновь вводимых параметров, относительно которых рассматриваются исследуемые явления.

В статье рассмотрены общие физические закономерности переноса излучения в разорванной облачности. Известно, что развитие облачных об-

разований сопровождается следующими процессами: увеличением геометрических и оптических размеров отдельных облаков и изменением их формы; объединением отдельных облаков и образованием облачных полей, характеризуемых баллом облачности N ; изменением микрофизических характеристик облачности и оптических, таких как индикатриса рассеяния излучения $f(\theta)$ и вероятность выживания кванта Λ ; изменением слоистой структуры облачности. Рассмотрим влияние каждого из данных процессов на радиационный баланс в отдельности. Рост геометрических размеров облаков обычно сопровождается ростом их оптических размеров; при этом микрофизические параметры могут оставаться постоянными. Увеличение оптического объема облака влияет на составляющие его радиационного баланса. Следует ожидать, что эти составляющие будут зависеть не только от оптического объема рассеивающей среды, но и от ее формы.

Вспользуемся моделью облака в виде параллелепипеда с оптической длиной τ_x , шириной τ_y , высотой τ_z . Освещение осуществляется коллимированным потоком излучения, направленным по нормали к плоскости yz при использовании декартовой системы координат. Индикатриса рассеяния излучения $f(\theta)$ характеризуется средним косинусом угла рассеяния θ . В процессе исследований изучалось влияние величины и формы оптического объема на величины пропускания T , отражения R и поглощения A облака, с индикатрисой рассеяния $C1$ [4] и со сферической индикатрисой, при условии нормировки $T+R+A=1$. В основу динамической модели облака положены следующие представления: увеличение вертикальной оптической плотности облака обычно сопровождается увеличением горизонтальной, причем рост последней идет существенно быстрее роста вертикальной. Отметим, что максимальное отражение наблюдается для среды, форма которой имеет наибольшую степень симметрии [5, 6].

Рассматривая простейшую ситуацию – деление одного облака на две части той же оптической длины, что и первоначальное, можно предположить, что пропускание целого облака будет равно сумме пропусканий его частей в силу принципа аддитивности, например, как в модели облачности в виде «экранов».

Известно, что принцип аддитивности может нарушаться в упомянутой модели в случае, если существует обмен энергией между «экранами». Однако анализ экспериментальных данных показывает, что не существует однозначной зависимости между пропусканием и баллом облачности даже при отсутствии взаимодействия между отдельными облаками. Известно [5], что изменение поперечных оптических размеров среды фиксированной длины приводит к изменению баланса излучения, распространяющегося в ограниченном объеме дисперсной среды, и, следовательно, величины пропуска-

ния. Так как при расчете радиационного баланса вычисляются потоки излучения в верхнюю и нижнюю полусферы, то при дроблении среды на отдельные не взаимодействующие части должно наблюдаться увеличение пропускания излучения, обусловленное увеличением доли многократно рассеянного света в нижнюю полусферу.

Расчет полей яркости излучения, рассеянного пространственно ограниченным объектом, является составной частью исследований радиационного баланса атмосферы [3]. Получение подробной информации о поле яркости сопряжено с определенными трудностями как в теоретическом, так и в экспериментальном плане. В связи с этим, имеет смысл ввести некий интегральный параметр, позволяющий оценить конфигурацию поля рассеянной радиации. В теории рассеяния конфигурацию поля излучения обычно определяют с помощью тела яркости в случае большого рассеивающего объема или индикатрисы рассеяния излучения при элементарном объеме. Индикатриса рассеяния содержит полную информацию об угловой структуре рассеяния, но если в такой информации нет необходимости, то достаточно знать степень анизотропии рассеяния, определяемую коэффициентом асимметрии. Другой общепринятой интегральной характеристикой рассеяния является средний косинус $\langle \cos\theta \rangle$, где θ – угол рассеяния. Данные параметры удобно использовать и в том случае, когда требуется оперативность в получении информации об угловом распределении рассеянного излучения, а также для классификации рассеивающих объектов. Обычно эти характеристики используются в предположении симметрии рассеяния. Для частиц неправильной формы предположение о симметрии рассеяния не выполняется, поэтому имеет смысл ввести интегральные параметры, определяемые в общем случае следующим образом:

$$\mu = \int_{\Omega} f(\theta) \cos(\theta) d\Omega,$$

где Ω – телесный угол.

Допустим, что свет падает вдоль положительного направления оси x . Интегральные параметры определяются в соответствии с выбранным направлением наблюдения.

Например, по оси x следует:

$$\mu_{+x} = 2\pi \int_0^{\pi/2} f(\theta) \sin\theta \cos\theta d\theta, \quad (1)$$

$$\mu_{-x} = 2\pi \int_{\pi/2}^{\pi} f(\theta) \sin\theta \cos\theta d\theta. \quad (2)$$

По оси y получается:

$$\mu_{\pm y} = 2 \int_0^{\pi} f(\theta) \sin^2\theta d\theta. \quad (3)$$

Тогда коэффициент асимметрии по оси x определяется формулой:

$$a_x = (\mu_{+x} + 2\mu_{+y}) / (\mu_{-x} + 2\mu_{+y}), \quad (4)$$

где коэффициенты μ определяются формулами (1)–(3).

Введение коэффициентов асимметрии, учитывающих анизотропию рассеяния по осям декартовой системы координат, обусловлено неоднозначной зависимостью среднего косинуса угла рассеяния и подобных ему характеристик от свойств среды, например, $\langle \cos\theta \rangle$ одинаков для рэлеевской и изотропной индикатрис рассеяния. Предложенные коэффициенты позволяют учесть асимметрию рассеяния по осям координат и тем самым устранить неоднозначность связи между параметрами среды и излучения. Данное обстоятельство особенно важно для частиц неправильной формы, в силу различных физических причин ориентированных в пространстве, например, в конвективных потоках, электрических полях и т. д. Тело яркости и индикатриса рассеяния характеризуют угловое распределение излучения внутри рассеивающего макрообъема. Однако определение этих характеристик внутри среды в ряде случаев связано со значительными трудностями, поэтому обычно рассматривают угловое распределение вне рассеивающего объема. По аналогии с коэффициентом асимметрии индикатрисы рассеяния элементарного объема целесообразно определить коэффициент асимметрии излучения, рассеянного макрообъемом. Аналогично формуле (4), анизотропию рассеяния излучения макрообъема будем характеризовать следующим коэффициентом:

$$A_s = (I_{+x} + B) / (I_{-x} + B), \quad (5)$$

где $B = (I_{+y} + I_{-y} + I_{+z} + I_{-z}) / 2$.

Здесь I_{+x} – поток излучения, выходящий из среды в направлении падающего потока вдоль оси x , I_{-x} – поток, отраженный средой; $I_{\pm y}$, $I_{\pm z}$ – потоки рассеянного излучения, выходящие из среды в направлениях $\pm y$, $\pm z$. В частном случае рассеивающей среды с квадратным оптическим сечением и симметричной, относительно оси x , индикатрисой рассеяния излучения, потоки $I_{+y} = I_{-y} = I_{+z} = I_{-z} = I$, и формула (5) принимает вид

$$A_s = (I_{+x} + 2I) / (I_{-x} + 2I).$$

Предложенные коэффициенты асимметрии являются информативными и чувствительными характеристиками, позволяющими достаточно точно оценить пространственное распределение рассеянной объемом радиации. Изучение поведения данных коэффициентов в зависимости от параметров среды позволяет оценить границы применимости закона Бугера, наступление глубинного режима и предельные оптические размеры, при которых среде можно считать неограниченной.

Результаты, представленные на рис. 1 и 2, позволяют сделать вывод, что кроме стандартного балла облачности N , отражающего степень покрытия определенной площади небосвода облаками, необходимо ввести параметр, характеризующий

степень дробления облачности $m = S_0 / S_1$, где S_1 – средняя площадь одного облака, а S_0 – площадь, на которой определяется балл облачности [7]. Наибольшее влияние степени дробления на радиационный баланс облачной атмосферы можно определить по величине расхождения между кривыми 1 и 2, 3 и 4, что при указанных на рисунках параметрах наблюдается при $N=0,6$. Балл облачности N является недостаточно информативной и неоднозначной характеристикой: например, при одном и том же значении N облака могут иметь различные оптические размеры, форму и степень дробления m , что, соответственно, влияет на составляющие радиационного баланса (рис. 1, 2).

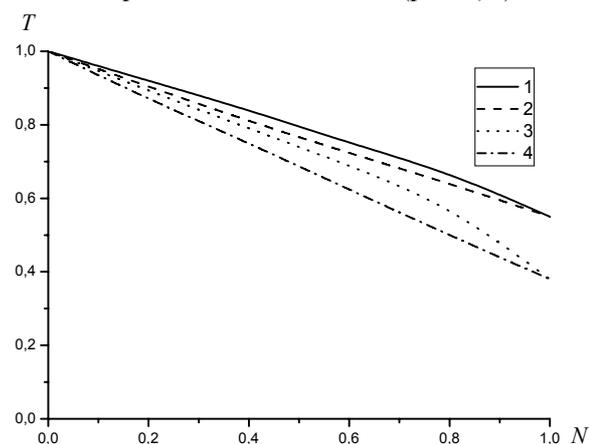


Рис. 1. Зависимость коэффициента пропускания атмосферы от балла облачности. Облачная индикатриса рассеяния S_1 , $\Lambda=1$: 1) $\tau_x=10$, $m=10^3$; 2) $\tau_x=10$, $m=1$; 3) $\tau_x=20$, $m=10^3$; 4) $\tau_x=20$, $m=1$

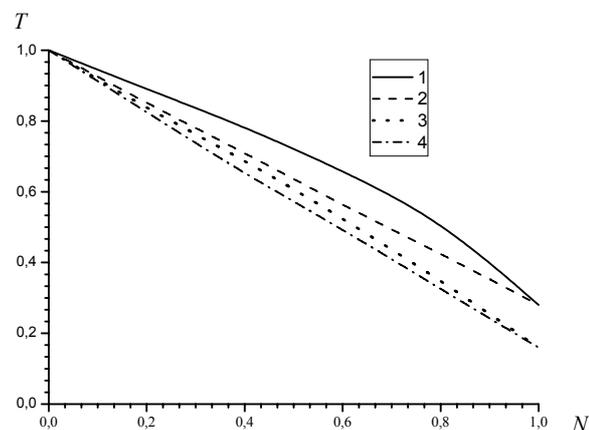


Рис. 2. Зависимость коэффициента пропускания атмосферы от балла облачности. Сферическая индикатриса рассеяния, $\Lambda=1$: 1) $\tau_x=5$, $m=10^3$; 2) $\tau_x=5$, $m=1$; 3) $\tau_x=10$, $m=10^3$; 4) $\tau_x=10$, $m=1$

Оптические размеры облаков наиболее сильно влияют на радиационный баланс атмосферы, однако, если эти размеры достигают определенной величины (рис. 3), то составляющие радиационного баланса (пропускание, отражение и поглощение) становятся постоянными. В этом случае можно обобщить принцип инвариантности Амбарцумяна [5], сформулированный для неограниченных (в по-

перечном к направлению распространения излучения) рассеивающих сред для пространственно ограниченной дисперсной среды: рассеивающая среда считается оптически бесконечной, если добавление тонкого слоя по периметру рассеивающей среды не меняет ее оптических характеристик. Постоянство оптических характеристик рассеивающей среды обусловлено неизменностью тела яркости внутри среды и является признаком наступления глубинного режима [2]. В этом случае коэффициент асимметрии (5) постоянен. Граница наступления глубинного режима зависит от оптических размеров и формы рассеивающей среды, вероятности выживания кванта, индикатрисы рассеяния излучения, степени дробления и балла облачности.

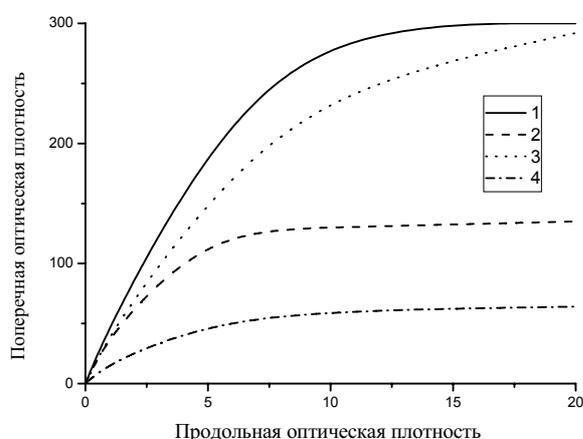


Рис. 3. Пограничные кривые. Сферическая индикатриса рассеяния: 1) $\Lambda=0,9$, 2) $\Lambda=0,7$. Облачная индикатриса рассеяния S_1 : 3) $\Lambda=0,9$, 4) $\Lambda=0,7$

Представленные на рис. 4 линейные зависимости коэффициента поглощения от балла облачности имеют такой вид только в том случае, если не учитывать влияние степени дробления облачности на величину поглощения; в общем случае это должна быть сложная кривая, находящаяся между прямыми 1 и 2 для сферической индикатрисы рассеяния, и между прямыми 3 и 4 для облачной индикатрисы рассеяния S_1 .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марчук Г.И., Кондратьев К.Я., Козодеров В.В., Хворостянов В.И. Облака и климат. — Л.: Гидрометеоздат, 1986. — 512 с.
2. Ленобль Ж. Перенос радиации в рассеивающих и поглощающих атмосферах. — Л.: Гидрометеоздат, 1990. — 264 с.
3. Зуев В.Е., Титов Г.А. Оптика атмосферы и климат. — Л.: Гидрометеоздат, 1996. — 256 с.
4. Дейрменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами. — М.: Мир, 1971. — 168 с.
5. Горячев Б.В., Могильницкий С.Б. Некоторые особенности переноса излучения в пространственно ограниченных диспер-

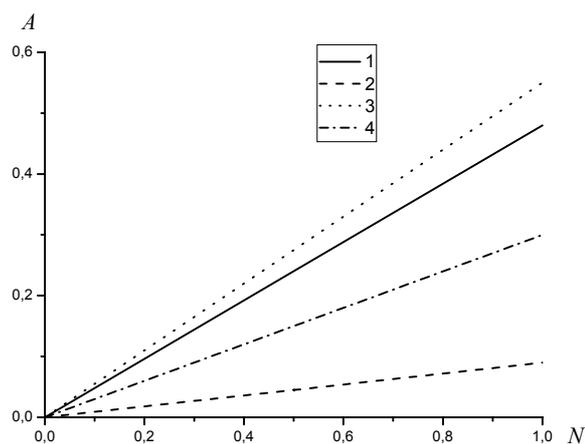


Рис. 4. Зависимость коэффициента поглощения атмосферы от балла облачности. $\tau_0=5$, $\Lambda=0,9$. Индикатриса рассеяния: 1, 2) сферическая; 3, 4) S_1

Выводы

1. Принцип инвариантности Амбарцумяна для рассеивающих сред неограниченных поперечных оптических размеров обобщен на случай пространственно ограниченных дисперсных сред.
2. Установлены предельные оптические размеры, при которых влияние облаков на радиационный баланс атмосферы постоянно.
3. Определена зависимость радиационного баланса облачной атмосферы от оптических размеров облаков при постоянном балле облачности и введен параметр, характеризующий степень дробления облачности.
4. Эффект «аномального» пропускания излучения в разорванной облачности является следствием эффектов «просветления» слоя дисперсной среды при его дроблении и резкого уменьшения поглощения при увеличении числа облаков, сопровождаемом уменьшением оптических размеров отдельного облака.
5. Наибольший вклад в альbedo облачной атмосферы вносят облака с максимальной степенью симметрии.

сных средах // Известия Томского политехнического университета. — 2000. — Т. 303. — № 3. — С. 91–104.

6. Горячев Б.В., Могильницкий С.Б. Исследование влияния размеров и формы рассеивающего объема на радиационные характеристики переноса излучения // Известия Томского политехнического университета. — 2003. — Т. 306. — № 5. — С. 12–15.
7. Горячев Б.В., Могильницкий С.Б. Перенос излучения в дисперсной среде при ее дроблении // Известия Томского политехнического университета. — 2007. — Т. 311. — № 2. — С. 42–45.

Поступила 01.07.2008 г.